

論文・報告

強混合型感潮河川河口部からの放流水の流動特性と水域環境への影響

山西 博幸¹

1. はじめに

国土交通省の統計によると、2010年度末での下水道普及率は75.1%で下水道整備人口も前年度に比べ、91万人増加したとされている（2012年国土交通省報道発表資料）。その一方で、従来型の画一的な整備促進以外の地域特性に応じた新たな手法の導入や促進も模索されている。

有明海湾奥部に位置する佐賀・低平地流域では、有明海特有の大きな干満差を有する水域にあり、下流域で排出された処理水の挙動特性は、上げ潮・下げ潮の動きとともに、河口部のみならず、広く河川上流域の水生生物にも影響を及ぼす。特に本水域下流部には全国総生産量の20%近くを誇る全国第一位のノリ養殖生産拠点があるほか、水産生物や底生生物、そして広大な干潟環境にも影響する可能性がある。一方で、ノリの色落ちやアゲマキ・タイラギといった特産貝類の漁獲高の激減など、有明海湾奥部での水環境と生態系への問題は未だ十分に解決されるに至っていない。

このような中、佐賀市下水浄化センターでは、下流域のノリ生産者との話し合いの中で、2007年から冬期（ノリ養殖期）の硝化抑制と夏期（ノリ休漁期）の硝化促進を試みている。一方、その水域への定量的な評価は今のところ全くなされていない。また、前述したように、有明海特有の流れ場に排出された処理水の挙動は、広く河川感潮域に影響を及ぼす。よって下水処理場から硝化を調整した処理水の排出手法を考える上で、このような流動場や高懸濁物を有する水環境場の中での挙動を十分に把握しておくことが重要である。また、下水処理場から排出される物質、とくに栄養塩類を中心とした物質の拡がり、河川生態系の立場や下流域の水産増養殖場への影響を把握する上でもこのような挙動解明は、処理場の管理等に有用な情報を提供するものと考えられる。

再整理を行うとともに、数値実験による放流口周辺での流れと物質輸送現象についてとりまとめ、地域特性に応じた水質や流域管理への提案のための第一歩とするものである。

2. 既往研究の整理

2.1 下水処理水の放流に伴う河川および河口沿岸域での流れと水質に及ぼす影響

下水処理場の設置にあたり、処理場から放流される処理水が排出先の水域において、どのような影響を及ぼすかについては、下流域に水産業が活発な地域ほどその放流水の行方と影響は深刻な問題である。したがって、これらが放流先の水域でどのような空間分布と挙動をするかを予測し、問題が生じる場合にはその対策を講じることが必要とされる。

図-1は、1980年に全漁連・全国污水公害対策協議会が出版した下水道問題に関する手引き書内に記述された下水処理水流入と漁場環境の内容を中田（1987）がとりまとめたものである。以下、これに従って本研究が対象とする佐賀市下水浄化センターとその放流先である有明海湾奥部水域とを関連させながら概説する。

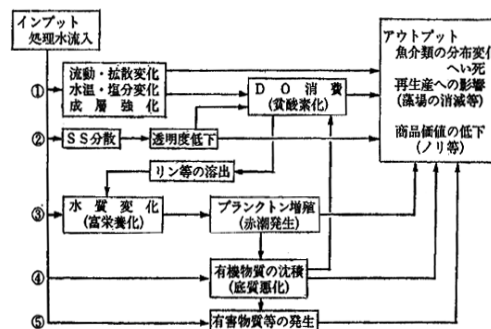


図-1 下水処理水の漁場環境への影響フロー
（中田, 1987）

本報では、関係機関との情報交換や既往研究の

1 佐賀大学低平地沿岸海域研究センター（〒840-8502 佐賀市本庄町1）

①放流水の流入に伴い、流れ場が変化し、水中物質の輸送特性が変化することとなる。また、特に冬期は処理場からの放流水の水温と現地水の水温差が生じやすく、かつ大量の淡水の流入で塩分変化がもたらされる。温水かつ低塩分の放流水は、水域での成層を強化することにつながりやすく、貧酸素水塊の形成や底生生物・魚類の生息環境に負のインパクトをもたらす可能性がある。特に、有明海では日本有数のノリ漁場を抱え、これらを起因としたノリの色落ちや病害等による生産性の低下などにつながりかねない。ただし、有明海の場合、潮の干満差が大きいため、希釈・混合が比較的促進されやすく、大きな問題とはなっていないようである。

②有明海湾奥部では潮の干満差が非常に大きい。ため、水中には常に高濃度の懸濁物が浮遊流動している。河口部では海水との混合による凝集・沈降が生じるが、淡水の流入によって、これら懸濁物の沈降性が悪くなり、透明度の低下と水中照度の低下をもたらす。また、懸濁物には有機物が付着しており、水中内の滞留時間が長ければ、その分、水中の酸素消費をもたらすことになろう。有明海湾奥部は、日本でも有数の泥干潟を形成し、干潟では豊かな生態系が形成されるとともに、これら生息生物を介した物質循環も盛んに行われている。したがって、これら生息生物への餌資源としての水中懸濁物の輸送特性が変化することは、干潟生態系に少なからず影響を及ぼす可能性もある。

③佐賀市下水浄化センターから排水される処理水中の有機物は、2次処理によってほぼ除去される。一方、窒素、リンの除去は、放流水質の基準はクリアしているものの、将来的な水域への栄養塩類の供給過多とならないよう注意が必要である。また、上記①、②にともなう水中のDO環境が悪化することで、底泥からのアンモニアやリンの溶出も生じ、水域での富栄養化が問題となる。一般に、放流水の排出先となる河口沿岸水域の富栄養化対策には2次処理に続く高度処理が有効である。ただし、窒素やリンといった栄養塩類は、水域での一次生産者である植物プランクトンの生長を促進させる栄養素としても重要なため、放流水から栄養塩を除去しすぎても、下流域の漁場への影響が懸念されることとなる。たとえば、有明海湾奥部の場合、ノリ養殖が始まる9月以降4月頃までは、むしろノリ養殖場では栄養塩としての窒素やリンが不足しがちである。したがって、下水処理は排出先の水域の栄養レベルを極端に変えないこ

とが重要と言える。

そのほか、④有機物質の沈積あるいは⑤とも関連する放流水中の残留塩素による生息生物への影響懸念もある。なお、処理水に対する遊離塩素添加によりノリの生育阻害物質が生成される報告（たとえば、丸山・三浦，1993）もあり、ノリのバイオアッセイについても注視する必要がある。

このような中、1978年11月に供用開始した佐賀市下水浄化センターは、ノリ漁場が近接する佐賀市西与賀町を流れる本庄江川河口に建設され、佐賀県有明海漁協と佐賀市との間で排水に対して協定書も取り交わしている。その後、佐賀市は2007年10月までに2回の周辺6町1村との合併・拡大に伴う下水処理量の増加受け入れ交渉を通じて、「1. はじめに」でも述べたように、ノリ養殖期にノリの生長に有用な栄養塩類を多く含む処理水放流を提案し、現在に至っている。具体的には、ノリ休漁期・ノリ養殖初期の4～10月は硝化を促進させ、水域への栄養塩負荷を抑制し、ノリ養殖期の11～3月は硝化を抑制させている。とくに、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は $\text{NO}_3\text{-N}$ よりもノリの吸収がよく、ノリの品質にもつながっている。図-2は、放流水中に含まれるT-Nと $\text{NH}_4\text{-N}$ の経月変化で、放流水の栄養塩供給が計画的に制御されていることがわかる（山口，2013）。今後の課題としては、水域への栄養塩負荷がノリ漁場に与える定量的評価とともに、有明海への将来的な流入負荷総量も含めた栄養塩の収支と有明海沿岸水域への影響等を引き続き監視し、明らかにしていく必要がある。

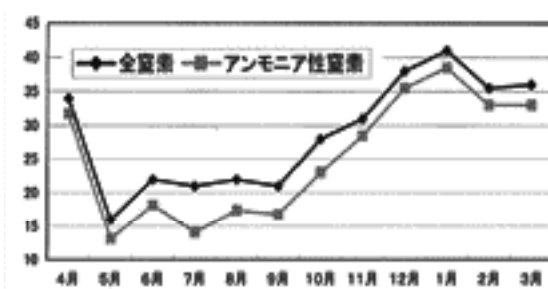


図-2 2011年度放流水中の T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の経月変化 (単位: mg/L) (山口, 2013)

2.2 水中懸濁物・底質と海水間における物質循環 (山西, 2007a)

前節2.1にて、SSの挙動が水環境に及ぼす影響について簡単に述べた。ここでは、水域内の輸送媒体としてのSSに着目し、これらが底質・海水間でどのような挙動を示すかについてまとめた。

とくに、有明海では大きな干満差により、強い潮流が発生するため、潮汐により干出・冠水を繰り返す干潟域では、底質が巻き上げられ、海水の水質に常に影響を及ぼしているものと考えられる。

図-3は、干潟底質の巻き上げ・沈降・溶出による栄養塩の挙動を模式化したものである。図より、海水中で有機物は懸濁態有機物（植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタス）、溶存態有機物として存在している。溶存態有機物は懸濁態有機物の分解によって生成され、さらに微生物等の働きにより、無機化され溶存態無機栄養塩となる。溶存態無機栄養塩は藻類にとっての必須栄養素であり、一次生産者である植物プランクトンに吸収され、再び懸濁態有機物を構成する。懸濁態有機物は底質表層に沈降し堆積有機物となる。干潟表層において堆積有機物は海水中と同様に分解され、溶存態有機物さらに溶存態無機栄養塩となる。堆積有機物は潮流によって巻き上げられ、再び海水中に懸濁態有機物として供給される。同様に、溶存態有機物・溶存態無機栄養塩も海水中に溶出供給される。後述するが、下水処理場からの放流水は下流域への影響のみでなく、上流域にも及んでいることが予測される。また、水中には100～1,000mg/L程度のSSが常時存在しており、放流水中に含まれる栄養塩類も上記で示したような挙動を有するものと思われる。次に、有明海湾奥部の泥干潟域を対象に実施したSSと栄養塩類との関係についてとりまとめる。

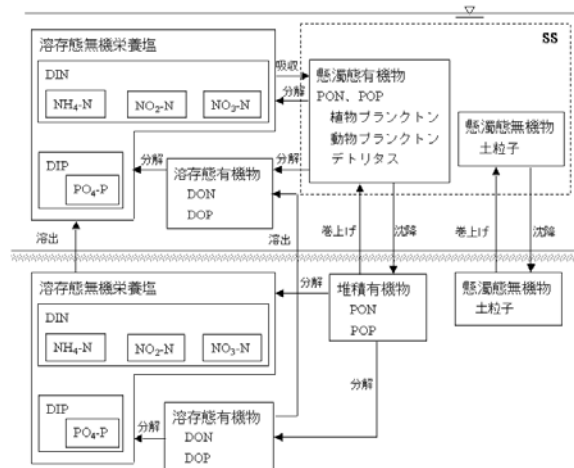


図-3 水中における栄養塩の挙動

2.3 有明海湾奥部における懸濁物質（SS）の動態と水質変動特性（山西, 2007b）

図-4は有明海湾奥部干潟域に設置した観測塔No.1,3で採水した試料中のSSとTN, TPとの関係

を示したものである。いずれの観測塔も岸から300～500m程沖側に位置している。図よりSSとTN, TPには強い相関が見られた。

$$TN = 1.91 \times 10^{-3} SS + 0.220 \quad (r=0.99) \quad (1)$$

$$TP = 8.4 \times 10^{-4} SS + 0.071 \quad (r=0.99) \quad (2)$$

つまり、水中のTN, TPの挙動はSSの挙動に依存し、巻き上げが干潟直上水質に影響しているといえる。なお、式(1), (2)の切片値は、それぞれ0.220mg/l, 0.071mg/lであり、これらはSS=0でのDN, DP値に相当し、後述する式(3), (4)の切片値とほぼ等しい。

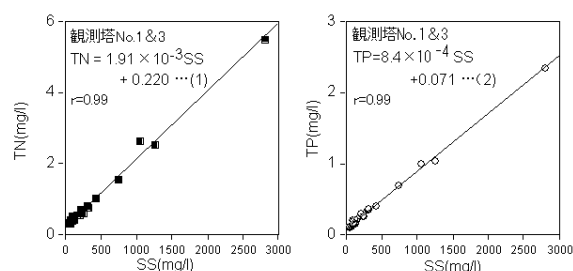


図-4 SSとT-N, T-Pとの関係（2006.9.6～9.7）

次に2つの観測塔におけるSSとDN, DPの関係を図-5に示す。図より上げ潮時のSSとDN, DPの相関は良好であるが、下げ潮時のSSとDN, DPには明瞭な相関は見られない。すなわち、SSとDN, DPの関係は、上げ潮時と下げ潮時で異なった関係にあることが分かる。また、同じSS

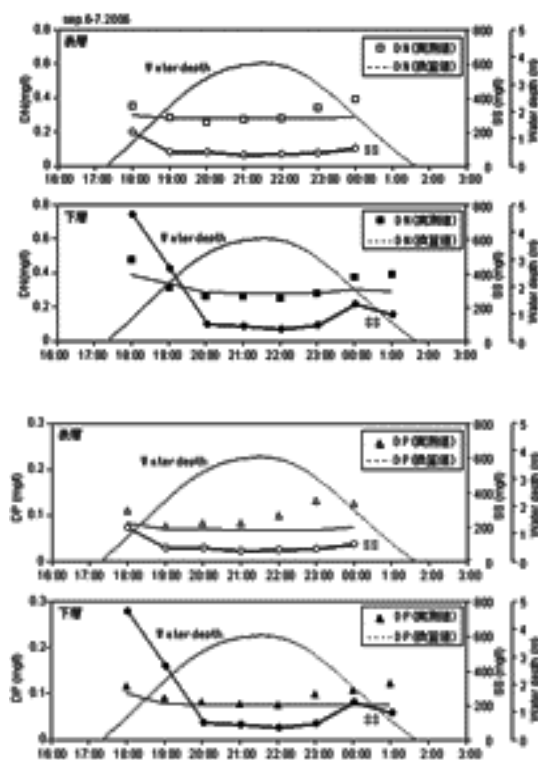


図-5 DN, DP, SSおよび水位の経時変化（2006.9.6-9.7, 大潮）

値でのDN, DP値は, 上げ潮時よりも下げ潮時の方が高い傾向にある。

さらに, 図-5は, 上げ潮時のSSと以下のDN, DPの関係式から, SS実測値をもとに換算し, これをDN, DP実測値とともに経時的に示したものである。

$$DN=1.62 \times 10^{-4} SS + 0.268 \quad (r=0.95) \quad (3)$$

$$DP=2.2 \times 10^{-5} SS + 0.074 \quad (r=0.69) \quad (4)$$

式(3), (4)を用いているため, 下げ潮での換算値と実測値の差は, 大きくなっている。これらの結果は, 干潟底泥の巻き上げが水中への主な栄養塩供給源となる上げ潮時とは異なり, 下げ潮時には干潟面の巻き上げに依存しない陸域からの流入負荷や高濃度の溶存態物質を含んだ水塊の流入があることを示している。

3. 潮汐に応じた水域の流れと放流口からの物質拡散に関する数値実験とその考察

佐賀市下水浄化センターは, 有明海湾奥部に位置する本庄江川の河口に位置し, 2010年実績で日平均およそ5,000トンの排水量を有している。ここでは, 本水域を図-6のような河川と河口部を持つ水域として想定し, ここに下水処理場からの放流口を設定した。基礎式は, 2次元の運動量式と



図-6 計算対象域と境界条件

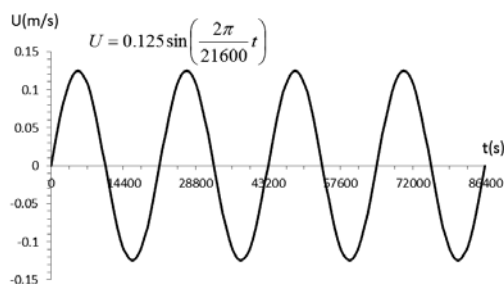


図-7 河口開口部における境界流速変化

拡散方程式で平面2次元とした。河口開口部及び河川上流部は開放境界とし, 河口境界に周期的な流速を与えた(図-7参照)。また, やや便宜的に, 放流口から濃度 $c=1\text{kg/m}^3$, $v=0.05\text{m/s}$ の放流条件を与えた。さらに, 物質拡散係数として $D=0.1\text{m}^2/\text{s}$

を与えた。ここでの計算には, 流れ場や粒子流動について有限要素法をベースとした汎用工学シミュレーションソフト (COMSOL Multiphysics ver. 4.3a) を用いた。なお, 上流境界は, 河川固有流が少ないことからここでは便宜的に0とした。

河口開口部を与えた流速より, 計算初期は干

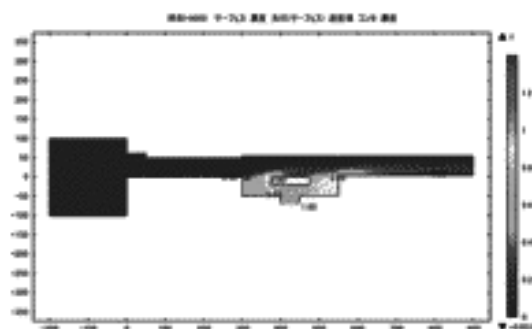


図-8 放流物質の濃度分布 1 (上げ潮, $t=9,000\text{s}$)

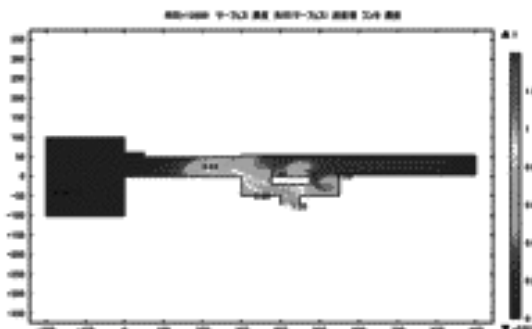


図-9 放流物質の濃度分布 2 (下げ潮, $t=12,600\text{s}$)



図-10 放流物質の濃度分布 3 (上げ潮, $t=19,800\text{s}$)



図-11 放流物質の濃度分布 4 (上げ潮, $t=23,400\text{s}$)

潮から満潮に向かう上げ潮の段階（0～10,500s）にあたり、この時間帯での流れと放流口からの物質輸送例（ $t=9,000\text{s}$ ）を示したのが図-8である。一般に、放流口からの物質輸送については放流口から下流域への輸送を主眼とする検討がほとんどだが、有明海のように干満差の大きな水域では、上流側への輸送を無視することはできない。また、処理水が放流先の水域に流入するとき、流入口付近では慣性項が効いて密度噴流的な振る舞いをすると考えられるものの、その後は排水周りの河川水を連行し、徐々に排水速度は周りの流れになじみ、慣性項が無視された拡散現象となる。図より、放流口から排出された処理水は、本川に流入し、一気に拡散されつつも、一部は主流部との希釈混合がなされずに水際に沿って上流側に輸送されていることもわかる。その後、満潮から干潮に向かう段階（10,500～21,600s）では、放流口からの処理水は河口に向かって流出し、河口部では処理水の希釈拡散がなされる様子が見て取れる（図-9、10参照）。この場合にも、河川水路左岸部には、処理水が本川主流部と希釈混合されずに水際を比較的高濃度で輸送されることが示された。さらに、図-11では上げ潮時に上流域への輸送も見て取れる。なお、ここでの計算には、塩分のような保存性物質の輸送を想定しており、そのため、河口部での希釈効果は単に場のスケールに応じた変化となる。窒素やリンといった富栄養化物質等を取り扱う際には、これらの質変換あるいは懸濁性であれば沈降速度等を考慮する必要がある。ここでは、あくまでも放流口を有する周辺水域での流れ場と物質輸送の概略を理解することに着目した計算としている。

さらに、図-12、図-13は計算開始時に放流口から浮遊粒子（密度 $\rho=1,000\text{kg/m}^3$ 、粒子径 $D=1\mu\text{m}$ 、リリース数 $N=1,000$ 個）を放出させた結果で、図-8、図-10と同時刻のスナップショットである。なお、固定境界および上流・河口境界に到達した粒子は、そこに付着するようにしている。図より、下げ潮時に河口部に放流されると同時に、先の議論と同様に上流側にも多数の浮遊粒子が輸送される。

これらの仮想的な水域での流れと物質輸送に関する数値計算結果は、下水処理水の放流口を含む水域での流動と拡散現象をおおよそ把握するのに役立つ。一方で、非保存性物質も含めた現地での物質輸送を厳密に再現することはかなり難しい。したがって、対象水域での放流水が平均的どのような挙動や濃度分布を有するのか、ある

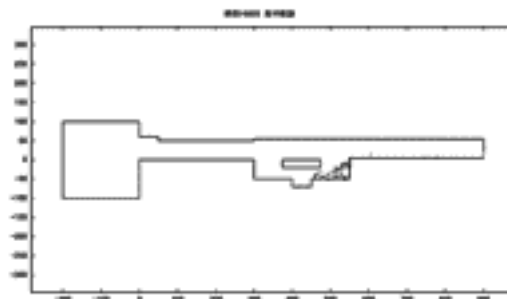


図-12 放流口から放出された中立粒子の輸送 1
(下げ潮, $t=9,000\text{s}$)

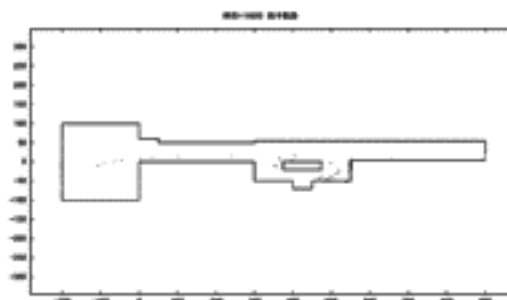


図-13 放流口から放出された中立粒子の輸送 2
(下げ潮, $t=19,800\text{s}$)

いは局所的な特異値や広がり幅などについて現地データと突き合わせつつ、現地予測モデルの精緻化とその利用に結びつける必要があると考える。少なくとも、今回の数値実験結果からも、放流口からの処理水の影響範囲は必ずしも下流域のみとは言えず、また、局所的に水際に希釈されないまま輸送される現象の存在とこのような水際には多数のヨシが繁茂していることも併せて興味ある結果と言える。

このような結果は、河口域での水位差が大きい有明海湾奥部での特徴とも言え、上流域へのインパクトや水際植生との相互作用、さらには放流先の本庄江川を含め、本水域に高濃度に存在する懸濁物質による吸着輸送との関係など地域特性を有した場における処理水放流のキーとなっていると思われる。

4. おわりに

ここでは、既往文献や既往調査をもとに、下水処理場からの放流水に関わる水域への影響、とくに現在、佐賀市下水浄化センターが実施している栄養塩濃度を調整した放流水の実態についてとりまとめた。また、有明海特有の干満差の中での水の流れや栄養塩類の挙動について、

懸濁物質との挙動の重要性を指摘しつつ、現状を整理した。さらに、現地を模した数値実験によって、放流口から排出される物質の輸送特性を示し、放流口から下流域ばかりでなく、上流域への影響調査の重要性も示唆した。

今後、有明海湾奥部の特異な水環境を有する場で、かつノリ養殖業を中心とした水産業が発達した河口部を有する地域特性に応じた新たな水質管理の導入と将来的な流域管理に向けて下水道が果たすべき役割についてとりまとめていきたい。なお、本研究は、土木学会環境工学委員会内の小委員会「今後の水環境保全に貢献する下水道システムの技術的課題と管理手法」の調査検討業務の一部として執り行われたものである。また、佐賀市下水浄化センター・山口徳雄前所長および岡健太郎氏から貴重な情報をご提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 中田英昭 (1987) : 7.生態系モデル, 下水処理水と漁場環境 (渡辺競編著), 恒星社厚生閣, pp.93-106.
- 2) 丸山俊朗, 三浦昭雄 (1993) : ノリ (海苔) を供試生物とした都市下水処理水の生物検定法に関する研究, 北海道大学衛生工学シンポジウム論文集, 1, pp.122-128.
- 3) 山口徳雄 (2013) : “宝の海”有明海に根ざした下水処理を目指して, 下水道協会誌, Vol.50, 603号, pp.47-50.
- 4) 山西博幸 (2007a) : 浅水域での底泥・懸濁物質が干潟形成と生息生物に及ぼす影響とその評価, 平成16~18年度科学研究費補助金基盤研究 (B) 研究成果報告書, 172p.
- 5) 山西博幸, 徳永貴久, 荒木宏之, 大石京子 (2007b) : 泥質干潟における懸濁物質の動態と水質変動に関する研究, 土木学会第62回年次学術講演会, 第VII部門, pp.261-262.